

丁仁海, 周后福. 九华山区下垫面对局地降水的影响分析[J]. 气象, 2010, 36(3): 47-53.

九华山区下垫面对局地降水的影响分析

丁仁海¹ 周后福²

1 安徽省九华山气象管理处, 九华山 242811

2 安徽省气象科学研究所, 合肥 230031

提 要: 利用安徽中尺度自动气象站的探测数据和多年统计数据, 对九华山区下垫面影响降水的地理分布及强度进行讨论, 分析下垫面物理过程在降水天气中的作用。结果表明: 山区的湿热条件及不稳定能量均强于周边地区, 非均匀下垫面的热力作用和山区地形作用形成地面中尺度风场辐合线及其所造成的上升运动对低空急流起加强作用, 这些均影响强对流天气的形成和发展。山区降水地理分布受地形影响很大, 山区的降水量、降水日数及降水强度均明显多于周边丘陵地区, 并有迎风坡降水明显及在一定高度内山体越高降水量越大的特点。逐小时地面自动站资料分析对山区强降水的形成、发展和消散具有很好的临近预报指示作用。

关键词: 下垫面, 风场辐合线, 低空急流, 不稳定性

Influences of Underlying Surface on Local Precipitation in Jiuhua Mountains

DING Renhai ZHOU Houfu

1 Jiuhua Mountain Meteorological Office of Anhui Province, Jiuhua Mountain 242811

2 Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031

Abstract: By using observation data of mesoscale automatic station in Anhui and statistic data, the influence of Jiuhua Mountain underlying surface on the distribution and intensity of precipitation has been discussed, and the role played by underlying surface physical processes in the precipitation has been analyzed. The results show that the heat and humid conditions and its unstable energy in mountainous area are stronger than in surrounding areas. The thermodynamic effects of non-uniform underlying surface and the mountainous topography lead to ground wind field convergence, and the resulting vertical ascending motion strengthens low-level jet, which affects the formation of strong convective weather and development. The topography in mountainous area has an obvious effect on the rainfall distribution. The mean annual precipitation, precipitation days and intensity are significantly stronger than others in the peripheral hilly area. Precipitation is significantly enhanced at the windward slope and greater at higher mountains. The study on automatic weather station data gives a good indication of nowcasting for the formation, development and decay phases of a rainfall event in mountain.

Key words: underlying surface, wind convergence line, low-level jet, instability

引 言

九华山为国家级 5A 风景区, 也是全球风景名胜区。它位于长江南岸的安徽池州市境内, 山区特

征明显, 最高峰海拔 1342 m, 区域面积约 120 km², 主要山脉接近南北走向(图 1)。九华山各景点分布在不同高度上, 所处地形地貌及气候相差较大。对九华山气候特点的研究发现, 九华山不仅有皖南山区多雨湿润的气候特征, 而且降水集中、强度大。年

平均降水量及强降水的强度,均明显偏多(强)于周边丘陵地区。

山区下垫面对降水是如何影响的,过去学者对这方面的研究倾向于地形对冰雹、暴雨等灾害性对流天气影响的个例诊断分析。矫梅燕等^[1]分析并指出地形对强对流天气有影响,郭金兰等^[2]对地形作用产生的一次强降水过程进行了分析,王华等^[3]指出了下垫面物理过程对强冰雹天气的重要作用,翟国庆等^[4]分析了中尺度地形对强降水区的分布有重要的影响。其他涉及到的内容多为用数值模拟研究

山体大地形对降水强度及落区的影响。肖庆农等^[5]认为山体高度不同,对上游气流的阻挡效应差别很大,小山丘地形则以下垫面作用影响降水而显著。本文以海拔高度在 1000 m 左右的九华山地形为分析对象,运用自动气象站加密观测数据及常规观测资料,从气候统计角度出发,对山区多次暴雨降水过程进行诊断分析,讨论山区下垫面影响降水天气的诸多因素,分析边界层物理过程通过对近地层的风场、水汽场及不稳定度的调整影响山区降水的一般特点,并探讨地形影响强降水的物理机制。

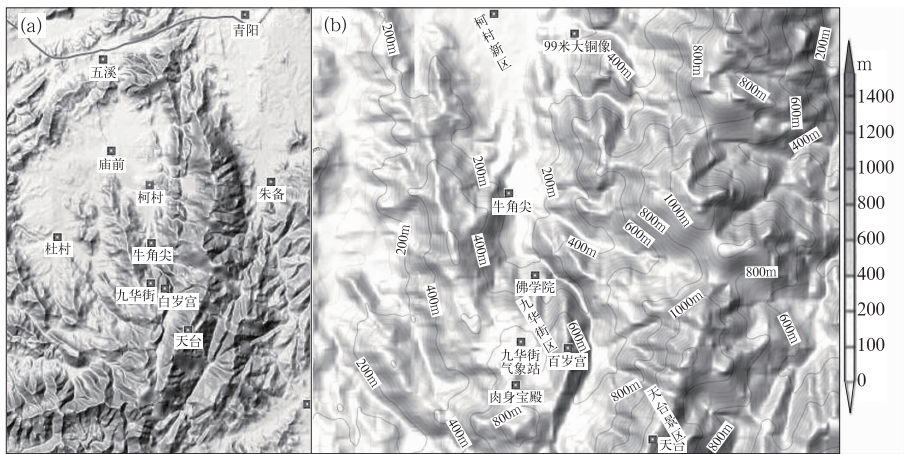


图 1 九华山景区等高线图

(a)全景图;(b)风景区图

Fig. 1 The diagram of isohypse in Jiuhua Mountain scenic spot

(a) overall view, (b) scenic spot view

1 九华山降水分布特征

1.1 山区与周边降水的对比分析

在九华山四周选相邻距离不足 50 km 的气象站点,其海拔高度见表 1,分别统计九华山与周边站点年、季平均降水量及 ≥ 0.1 mm 和 ≥ 50 mm 的年平均降水日数(表 1),其中九华山资料取自 1983—2000 年九华街测点的数据,其他站为 1971—2000 年。从年、季平均降水量的分布来看,九华山降水量明显大于周边站点降水量,大约多出 2~6 成,尤其是雨季明显偏多。另外,九华山的降水日数多出 19~37 d,暴雨日数更是明显多于周边,表明山区更容易发生暴雨。

山区地形不仅影响降水量的分布,对雨强也有重要影响。应用中尺度自动气象站观测网资料,以

表 1 各站点海拔高度、年季平均降水量及降水日数

Table 1 Station height (above sea level), average precipitation and precipitation days in Jiuhua Mountains and its adjacent stations

站名	九华街	青阳	铜陵	池州	石台
海拔高度/m	647.3	31.0	37.5	35.0	64.7
年平均降水量/mm	2174	1563	1365	1469	1649
12—2 月降水量/mm	246	184	160	172	191
3—5 月降水量/mm	626	485	430	487	538
6—8 月降水量/mm	920	624	541	572	685
9—11 月降水量/mm	382	270	234	238	235
≥ 0.1 mm 降水日数/d	172.0	152.7	135.3	141.1	152.9
≥ 50 mm 降水日数/d	9.4	5.8	4.3	6.1	6.1

九华街日降水 ≥ 50 mm 为统计日,给出 2007—2008 年 7 次暴雨天气过程中山区及周边站点的雨量(表 2)。强降水过程中山区平均降水量多于周边站点。多数情况下山区明显偏多,甚至有个别过程中,山区出现大暴雨时,周边有站点不足 10 mm。只有少数情况各站降水量级大体相当。

表2 2007—2008年暴雨日九华山
与周边站点的降水量(单位:mm)

Table 2 Heavy rain day of Jiuhua Mountains
and rainfall (unit: mm) at adjacent stations

暴雨日期	九华街	青阳	铜陵	池州	石台
2007.7.10	227.5	115.6	0.3	18.6	18.0
2007.9.19	221.3	123.9	135.4	75.9	68.3
2007.10.7	121.2	27.5	9.6	2.0	6.4
2008.6.10	88.4	51.6	27.0	44.1	92.4
2008.6.17	69.6	63.7	52.9	56.1	60.6
2008.6.23	57.6	38.7	20.5	26.1	28.7
2008.8.1	51.1	46.7	41.2	52.1	53.5
平均	119.5	66.8	41.0	39.3	46.8

1.2 山区强降水的地域特征

九华山区域内有6个中尺度自动气象观测点。为分析方便,将距九华街较近的青阳划入研究范围,各点海拔高度如图2下半部所示。杜村、牛角尖和朱备分别位于山脉的东西两侧,牛角尖、九华街在喇叭口地形迎风坡的不同高度上,天台接近山顶,青阳高度最低,且所处地势较平坦,各点分布见图1。2007—2008年的7次暴雨在不同高度、不同位置上的降水量差异较大(见图2),但降水的分布有一定规律:(1)在一定高度内降水量随高度增加而增大,超过这一高度随高度增加降水量反而减少,即山区存在最大降水高度,它位于九华街到百岁宫一线。如天台的高度超过百岁宫,但是多数暴雨过程中其降水少于百岁宫。(2)从杜村到百岁宫,多数情况下处在迎风坡,其降水量随高度增加而明显增大,且

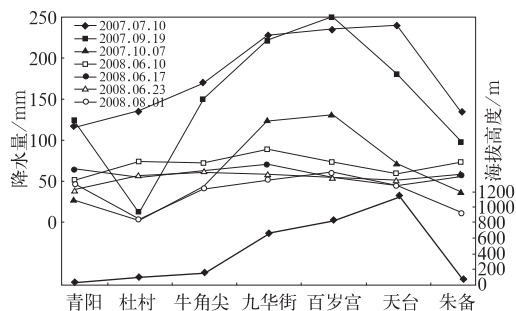


图2 各暴雨日在山区不同高度
测点上降水量的分布图

(图下部实折线为各测点的高度分布)

Fig. 2 Rainfall measured by stations at
different heights during heavy rain days
(Real line underside shows
height distribution every station)

大于同高度背风坡的降水(如朱备)。(3)牛角尖、九华街处在喇叭口地形位置,平均降水量略多于同高度其他观测点,若是迎风则降水明显偏多。(4)青阳所处地势平坦,受山区地形影响较小,远不如处在山谷的杜村降水量波动性大。

1.3 九华山降水分布的一般特征

九华山因山区特征明显,决定其降水时空不均匀性极为显著,地形对降水的分布及其强度有重要影响。其降水特征概括为:山区常年平均降水量偏多于周边丘陵地区;强降水过程中,山区的降水量及强度更明显偏多;山上降水量在一定高度内随高度上升呈增多趋势,且迎风坡、喇叭口处降水偏多;山区暴雨日数和一般性降水日数均多于周边站点。

2 地形作用对降水的影响

2.1 起伏的地形对地面风场的影响

山区地形起伏大、湍流交换强,故能产生较大的摩擦力。地表摩擦力越大,实际风偏离地转风的交角也越大。在2007—2008年九华街出现的7次暴雨的最大1h降水量内,各取一次10min风向风速(风场对应的时间见表3最后一列),从图3的风场可见,在暴雨天气过程中,山区风场(图中的椭圆区域)与周边风场(称环境风)有明显不同,风向或风速均有差异,有的风向改变,有的风速变化,均表现为风场辐合。假设周边环境风代表地转风 V_g ,山区实际风(V)与环境风有交角形成地转偏差 D ,由摩擦层中的地转偏差公式 $D = V - V_g = \frac{1}{f}k \times F$ 可见,地面摩擦力(F)作用的结果引起山区风向与环境风的差异,即风向发生改变。分析各暴雨日降水时段内的风场时间剖面图(图略)发现,降水量随高度分布差异越明显对应风的垂直切变越强。

进一步分析发现,山区风场发生改变与强降水的开始和增强有一定的时间关系。一般在山区风向明显偏离周边风向开始出现辐合后1~2h,主要降水开始(见表3第2、3列的关系),且降水强度最大1h相应的风辐合也最强,图3中(a)至(g)中各风场时间与各暴雨日最大1h降水量时间所对应。因此,地形引起的风场辐合,影响山区强降水的产生和发展,对夏季强对流天气的预报具有一定的指示意义。

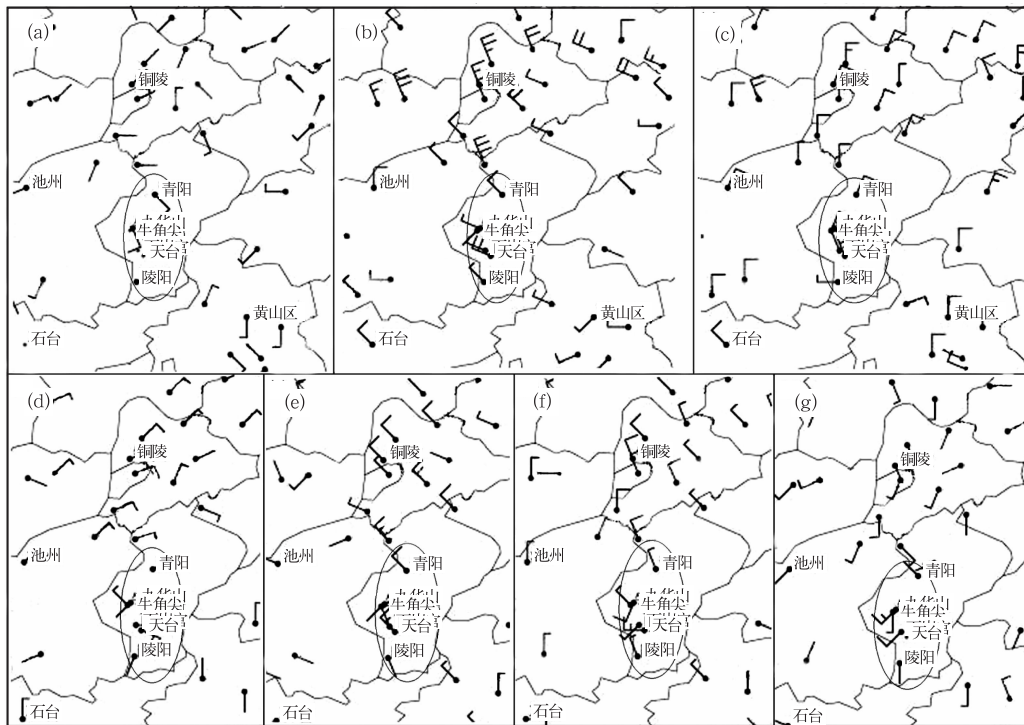


图 3 2007—2008 年暴雨日九华山及周边测点风场(风矢,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

从(a)到(g)依次为表 3 所列的 7 次暴雨在各自最大降水时的 10 min 风向风速

Fig. 3 Heavy rain day of Jiuhua Mountain and wind field of adjacent stations from 2007 to 2008
(10 min wind direction and velocity of maxmun rainfall from (a) to (g) as 7 heavy rains listed in Table 3)

表 3 各暴雨日的主要降水时段、最大 1 h 降水量及相应风场特征和出现的时间

Table 3 Main rainfall time, 1 h maximum precipitation, wind field and appearance time for each heavy rainfall

暴雨日期	主要降水时段 (北京时)	山区风场开始 变化时间	最大 1 h 降水量 (mm)/时次	周边环境风向	山区风场 变化特征	图 3 中各 风场时间
2007. 7. 10	02—06	01:30	50. 0/3	偏西风	风向变化且有辐合中心	03:00
2007. 9. 19	07—23	05:20	18. 3/20	偏北风	风速变化	19:40
2007. 10. 7	10—23	09:50	13. 8/21	偏北风	风向变化	20:20
2008. 6. 10	05—12	04:50	18. 3/6	东北风	风向变化且有辐合中心	05:30
2008. 6. 17	16—18	14:30	14. 6/17	西北风	风速变化明显	16:50
2008. 6. 23	09—17	07:50	16. 4/17	偏北风	风向变化明显	16:50
2008. 8. 1	03—09	01:50	16. 0/3	偏南风	风速变化	03:00

2.2 迎风坡地形的抬升作用

山脉迎风面对过境降水系统的增幅作用是显而易见的,其作用大小与山的坡度及风向有关。九华山山脉呈南北向,上游气流过山时遇山脉阻挡,改变了近地层风场的垂直结构,如图 4 所示。迎风坡流线倾斜大,山顶处的流线接近水平,呈西厚东薄的楔状。气流沿 X 方向从山底 X_1 处经半山腰 X_2 到山顶 X_3 ,随高度的增加流线由疏变密。风 V 沿流线方向加速运动, $V_3 > V_2 > V_1$, 因此风的水平分量 u_3 最大,即山顶处风速最大。同时气流在上升过程中又

形成水平风垂直切变。由于气流在半山腰 X_2 处坡度最大,使得风的垂直分量 w_2 也最大,即上升运动最强。九华山最大降水高度正是位于半山腰处的九华街到百岁宫一线。在降水过程中,抬升作用使山体高度的增雨作用明显,表 1 和图 2 都说明这一点。陶诗言等^[7] 研究指出,地形对暴雨的落区和幅度有影响,强调山脉地形对暴雨有加强和增幅作用,并影响强降水的落区。在 2007—2008 年暴雨统计中,九华街、百岁宫有 7 次暴雨,牛角尖、朱备、天台有 5 次,杜村、青阳只有 4 次达到暴雨,降水量分布不均。

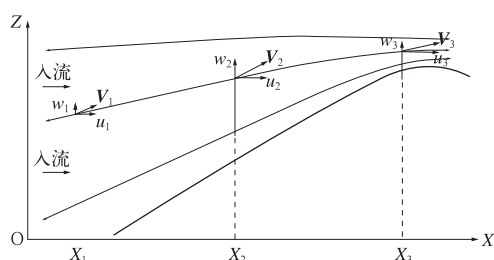


图4 气流过山流线在迎风坡的垂直剖面图
(细实线为流线,粗实线表示山体迎风坡)

Fig.4 Vertical section of air flows at windward side
(Thin line shows streamline, and thick line shows windward side)

2.3 喇叭口、背风坡地形对降水的影响

柯村新区至牛角尖为一开口朝北的喇叭口地形,牛角尖在喇叭口底沿,牛角尖、九华街又在迎风坡的不同高度上(见图1),二处特殊的地形使每次强降水过程的降水量具有地形雨特征。2007年的3次暴雨中,环境风吹偏北风或偏西风,这时喇叭口地形作用变得明显,牛角尖降水量大于高度相近(如朱备)的降水量。当气流沿坡而上至九华街,造成气流辐合上升加强,使该处降水加大。2008年的3次暴雨中,牛角尖降水量也几乎接近百岁宫的降水量。在喇叭口地形边沿由于下垫面的温压差异造成沿山脉走向的辐合线一般维持时间较长,图7中在牛角尖到九华街之间从04:50到05:50的风场辐合线与强降水出现时段相吻合。在7次暴雨天气中,降水系统由西入侵,朱备处在背风坡,降水量多次小于迎风坡高度相近处的雨量。

3 气象条件分析

3.1 不稳定能量

地形热力作用、地面风场辐合和气流过山在迎风坡受迫抬升均能产生上升运动。气流上升触发不稳定能量释放,产生对流天气。以大气一般状态(潜在不稳定型)为例,即状态曲线与层结曲线相交于F点(称自由对流高度),见图5的 $T-\ln p$ 示意图。当上升气流突破稳定层升至F点,对流就能发生、发展。因此,山区的高能高湿及层结条件不稳定,使得山区可供释放的对流不稳定能量强于周边站点,而山区的地形作用又为不稳定能量释放提供了触发条件。此时若处在大气尺度上升运动区域并有中尺度雨团或雨带过境,在山区将产生强降水。

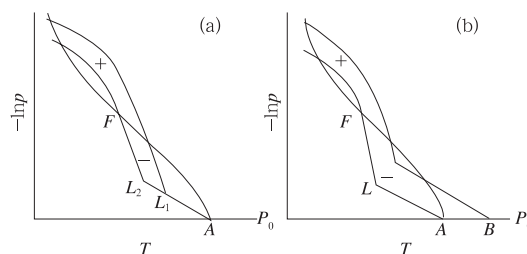


图5 $T-\ln p$ 示意图
(L点为抬升凝结高度,“+”为不稳定区域,“-”为稳定区域)

Fig.5 $T-\ln p$ sketch chart
(point L represents lifting condensation level, “+” unstable area, and “-” stable area)

3.2 水汽条件

图6为九华街7次暴雨的主要降水时段的平均

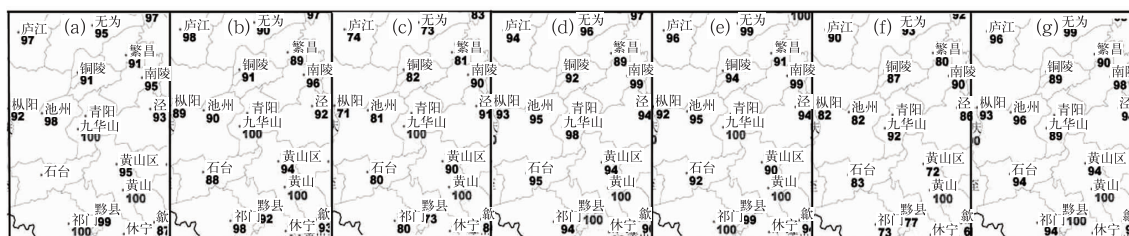


图6 九华山及周边站点暴雨降水时段内的平均相对湿度(单位:%)

从(a)到(g)依次为7次暴雨在各自主要降水时段内的湿度分布

Fig.6 Average relative humidity in Jiu Hua Mountain and adjacent stations during heavy rainfall period
(Humidity distribution of main rainfall from (a) to (g) in turn for 7 heavy rains)

相对湿度,可见九华山区处在高湿区,相对湿度有4次为饱和状态,一次为近饱和状态,比周边站点明显偏大。与气候统计值比较,九华山相对湿度又比周边大2~3成。地形抬升作用增加高低层水汽的交

换,使低层水汽向空中输送。山区充沛的水汽使凝结高度降低,地形抬升作用使饱和水汽层的上层抬高,二者使得山区上空的水汽饱和层变厚,有利于云滴增长,还有利于对流发展。从图5的 $T-\ln p$ 示意

图可见,山区湿度大,上升空气达到凝结的高度降低至图 5a 中的 L_1 点,则湿度大的气层形成的层结曲线使不稳定能量增大。

3.3 热力条件

山区地表受太阳直射加热,升温高于周边自由大气。以百岁宫(接近九华山平均高度)为例,它与山下牛角尖高度相差 677 m。就气候统计而言,二点年平均气温相差 $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$;由自动气象站的温度资料统计上述 7 次暴雨的平均气温,二点相差 $-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。若以大气温度直减率 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 计算,同高度自由大气温度是 $-4.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,则百岁宫和牛角尖二点水平温差为 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (常年情况)或 $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (暴雨天气时)。显然山上相对于同高度周围大气是热源,这种温差有利于形成局地热力环流,即山区为上升运动四周为下沉气流。热量这种不均匀分布也影响大气稳定度。山体与四周因热力差异形成的上述温差,相当图 5b 中 AB 二点的温度差,这时山区大气的层结曲线由 A 移到 B 点,即不稳定能量增大。下垫面的热力差异使山区局地热对流天气过程增多,降水日数也随之增多。

3.4 动力条件

九华山大部分暴雨均与低空急流有联系。杨晓亮等^[8]研究表明,低空急流一方面向暴雨区输送暖湿空气,造成对流不稳定层结,一方面在暴雨区产生辐合,触发不稳定能量释放。山区地形动力作用对低空急流的影响有:(1) 大气潮湿不稳定,低层辐合上升获得了加强,上升气流使水汽大量凝结,凝结潜热的释放又使低层气压降得更低,气压梯度变大则低空急流的风速加大。(2) 气流过山改变了近地层风场结构,水平风在山顶附近明显增大,同时又在山体垂直方向形成切变(图 4)。九华山顶处高度接近 850 hPa,低空急流风速由此增大。气流爬坡时的抬升作用既加速低空急流的辐合上升,也加大了高低空急流耦合产生的次级环流的上升速度。周军称其为地形的“内边界层效应”^[9]。屠妮妮等^[10]分析指出低空急流在低层所提供的水汽、不稳定层结和动力环境条件下容易得到强烈发展,造成暴雨及强对流天气发生。2007 年 9 月 19 日大暴雨就是台风低压、低空急流和山区地形抬升共同作用的结果。当日低层高度场上,九华山为一致的西南风急流,日降水量 221.3 mm,雨强在 20 时达最大,为 18.3 mm

$\cdot\text{h}^{-1}$,对应 850 hPa 风场出现 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 最大急流风速。

王华等在文献[3]指出了风场垂直切变加强有利于上升运动的维持和低空水汽的流入。风场垂直切变可以通过迎风坡不同高度加密资料分析。图 7 是九华山区 2008 年 6 月 10 日最大降水时次每 10 min 一次的风向风速。从青阳到天台各点海拔高度是增加的,池州代表环境风场。由图可见,周边环境风一直维持东北风少动。04:50 至 05:50 在牛角尖到九华街有地形辐合线维持,04:50 至 05:10 百岁宫到天台及 05:30 至 05:50 九华街到百岁宫在垂直方向均有风向切变。高层牛角尖到天台在 05:10 至 05:30 及低层青阳到牛角尖在 05:30 至 05:40 风向随时间发生明显变化,而在 06 时各高度风向基本一致,降水随之减弱。山区尽管风速不大,风场切变及气流的扰动引起的辐合上升在强降水时段却一直存在。风垂直切变的维持与主要降水段有较好的相关性,可以作为强降水临近预警的参考。

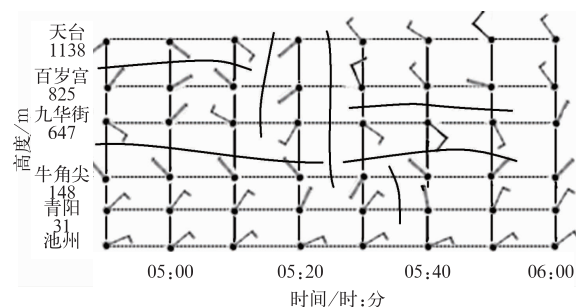


图 7 2008 年 6 月 10 日九华山区最大降水时各高度风场时间剖面图
(曲线为风场辐合线)

Fig. 7 Time-height cross section of wind field in Jiuhua Mountains during maximum rainfall
(Curve represents wind convergence line)

地形影响低空急流及强对流天气的物理机制:低层偏南暖湿气流在山底堆积,地形风场辐合增加山区空气湿度和对流不稳定性。当系统或低空急流过山产生的垂直扰动与顺喇叭口地形沿坡爬升启动气流作上升运动,并触动对流不稳定能量释放,垂直上升运动及低空急流得以维持和发展。上升运动又使低层辐合和风垂直切变加强,水汽辐合增加并与降雨时的凝结加热共同作用,使强对流和低空急流得以持续发展,降水强度增大。

4 小结与讨论

山区降水尤其是暴雨的产生除与大尺度环流背

景有关系之外,还具有明显的地域特征。无论是历年降水资料统计,还是强降水天气过程分析,均表明处在相同的天气背景下,由于山区下垫面改变了气流的运动方向和速度,使得山区降水比周边偏多偏强,同时山区降水量分布不匀。山区下垫面对降水过程的影响有以下结论:

(1) 山区具有比周边丘陵地区优越的水汽供应和不稳定层结条件;山区地势的不均匀性引起的气流辐合及其所产生的上升运动触发不稳定能量释放;迎风坡及喇叭口地形作用使气流的垂直运动加强。这些对降水系统过山起增强作用,使降水强度增大。地面中尺度风场辐合越强,对降水系统的增雨作用就越大。山区降水地理分布受地形影响很大,强降水中心一般位于地形作用对气流影响明显的地带,即喇叭口地形和迎风坡处降水明显,并在一定高度内山体越高降水量越大。

(2) 山区的湿热条件、不稳定条件和地形辐合抬升作用一起构成对低空急流在山区的发展和加强的有利因素;边界层内风垂直切变及地形坡的“内边界层效应”有助于低空急流的加强和维持,这些使得山区的暴雨量及强度大于周边地区。

(3) 山区非均匀下垫面的热力作用、充沛的水汽条件和地形抬升作用产生的局地降水天气使山区降水日数增多。山体阻碍天气系统的过境,也延长了降水时间。

实际上,地形作用对天气系统的影响是复杂的,对不同系统影响的程度是不一样的,这与每次天气过程的具体天气条件和天气系统有关。由于九华山地形空间尺度较小,很难定量诊断各种因素影响的大小,但并不影响对山区降水量分级预报的指导作用。

参考文献

- [1] 矫梅燕, 毕宝贵. 夏季北京地区强地形雨中尺度结构分析[J]. 气象, 2005, 31(6): 9-14.
- [2] 郭金兰, 刘凤辉, 杜辉, 等. 一次地形作用产生的强降雨过程分析[J]. 气象, 2004, 30(7): 15-17.
- [3] 王华, 孙继松. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用[J]. 气象, 2008, 34(3): 17-21.
- [4] 翟国庆, 高坤, 俞樟孝, 等. 暴雨过程中尺度地形作用的数值试验[J]. 大气科学, 1995, 19(4): 475-480.
- [5] 肖庆农, 伍荣生. 地形对于气流运动影响的数值研究[J]. 气象学报, 1995, 53(1): 38-49.
- [6] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 51-52.
- [7] 陶诗言, 倪允琪, 赵思雄, 等. 1998年夏季中国暴雨的形成机理与预报研究[M]. 北京: 气象出版社, 2001: 169-175.
- [8] 杨晓亮, 李江波, 杨敏. 河北2007年7月18日局地暴雨成因分析[J]. 气象, 2008, 34(9): 47-56.
- [9] 周军. 大气的边界效应与落基山东侧的低空急流的形成[J]. 南京气象学院学报, 1984, (1): 19-20.
- [10] 屠妮妮, 段玮. 2006年9月4-5日四川暴雨过程分析[J]. 气象, 2008, 34(7): 51-60.